

УДК 621.92

**Ю.А. СИЗЫЙ, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»**  
**А.В. ФЕСЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»**  
**Ю.Н. ЛЮБИМЫЙ, асп., НТУ «ХПИ»**

## **ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТЬ ПРОЦЕССА КРУГЛОГО ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ С ОХЛАЖДЕНИЕМ**

Анотация. У статті отримано рішення задачі розрахунку температурного поля у заготовці при шліфуванні з різною інтенсивністю її охолодження в зоні контакту і поза ним. Проаналізовано вплив охолоджуючої дії мастильно-охолоджувальної рідини на температуру поверхні, що обробляється.

Abstract. In the article the task of calculation temperature field in a blank in the process of grinding by wheel with interrupted surface with different intensify cooling in the cutting zone and out of zone contact of wheel with blank are solved. The influence of cooling action of coolant on temperature in grinding surface are analyzed.

Известно, что процесс прерывистого шлифования в сравнении со сплошным обеспечивает снижение максимальной температуры примерно на 30-40%, что подтверждается теоретическими расчетами, выполненными достаточно глубоко и обширно, охватывая разнообразные виды шлифования и объекты обработки [1, 2, 3].

Анализ этих исследований при прерывистом шлифовании показал, что в фазу отсутствия контакта круга с обрабатываемой поверхностью охлаждение ее в основном обеспечивается теплопроводностью этой поверхности. При этом высокая интенсивность оттока тепла от поверхности в тело детали обеспечивается большим градиентом температуры после контакта с кругом в направлении нормальном к обрабатываемой поверхности. Дополнительный отток тепла от нагретой поверхности обеспечивается за счет конвективного теплообмена с окружающей средой (воздухом или смазочно-охлаждающей жидкостью). Однако охлаждающее действие СОЖ оказывает заметно меньшее влияние на общее охлаждение поверхности в фазу отсутствия контакта круга с деталью. Это объясняется не только известной меньшей интенсивностью теплопередачи конвективным теплообменом по сравнению с теплопроводностью, но и тем, что попадание СОЖ в пространство между выступами прерывистой поверхности круга затруднено. Поток СОЖ в пространство между выступами круга препятствует поток воздуха, увлекаемого кругом, вращающимся с большой скоростью. Для обеспечения интенсивной подачи СОЖ в пространство между режущими выступами круга делаются попытки подвода СОЖ через круг. Это достигается, например, подачей СОЖ через корпус сборных абразивных сегментов круга [4]. Кроме этого, возможна и подача СОЖ непосредственно в зону контакта выступа круга с деталью через поры круга.

Для внедрения указанных методов интенсификации охлаждения желательно иметь возможность теоретического анализа и прогнозирования предполагаемых результатов.

Теоретическое описание тепловых процессов при плоском шлифовании с охлаждением выполнено в работе Сипайлова В.А. [2], в которой им получены приближенное и точное решения. В приближенном решении не учитывается различие в теплоотдаче при контакте круга с обрабатываемой поверхностью и его отсутствием. Принимается, что теплоотдача конвективным теплообменом имеет место в течение всего времени прохождения круга над точкой поверхности как в момент контакта, так и в момент его отсутствия.

Точное решение устраняет этот недостаток, в нем учитывается, что в момент контакта конвективный теплоотвод отсутствует. Однако, пользоваться точным решением затруднительно, и точный анализ нагрева и охлаждения при прерывистом шлифовании как у Сипайлова В.А. [2], так и у Якимова А.В. [3] основан на приближенном решении Сипайлова В.А. [2].

Таким образом, их решения обладают общим недостатком – не учитывают отсутствие теплообмена с окружающей средой в момент контакта круга с обрабатываемой поверхностью или его наличие за счет СОЖ, поступающей в зону контакта через поры круга. Эти решения представлены в безразмерных величинах, что позволяет, как широко принято в теории теплопроводности, выполнять значительно более обобщенный анализ.

Однако это преимущество в некоторой степени завуалирует удобные, привычные параметры круга, режимы шлифования и теплофизические константы, что создает определенные неудобства для специалиста производства, анализирующего и внедряющего прерывистое шлифование.

На основании изложенного, в статье решается задача описания температурного поля в детали при прерывистом круглом наружном шлифовании, учитывающего различную интенсивность охлаждения при контакте круга и его отсутствии с обрабатываемой поверхностью в виде удобном для практического специалиста, владеющего широко применяемыми математическими пакетами программ для ЭВМ, например, MathCad.

В статье [5] решена задача теплопроводности с теплообменом для круглого наружного шлифования при быстродвижущемся ограниченном по ширине источнике тепла. Показано, что для типичных условий круглого наружного шлифования тепловой источник (поверхность контакта круга с заготовкой) можно принять быстродвижущимся согласно условию [6]:

$$Pe = \frac{V_o \cdot L}{\alpha} \leq 10, \quad (1)$$

где  $V_o$  – скорость перемещения заготовки;  $L$  – размер источника тепла в направлении вектора  $\vec{V}_o$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности.

Кроме этого, в [5] проведено сравнение решений при движущемся и быстродвижущемся источниках тепла и показана их близость (отличие 1,5%). Описание температурного поля в заготовке при круглом наружном шлифовании [5] выполнено из условия, что этот вид шлифования подобен плоскому.

Если наружную поверхность цилиндрической заготовки развернуть в плоскость, то задача теплопроводности для круглого шлифования можно решить как для плоского, т.е. в прямоугольной системе координат. Привяжем источник тепла – плоскость контакта круга с деталью, к прямоугольной системе координат XYZ с центром в середине источника. Согласно рисунку 1 в [5] получено

$$T(x,y) = \frac{q \cdot \sqrt{\alpha}}{\lambda \cdot 2 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\tau} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \cdot \exp \left[ -\frac{x^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau-t)} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot (\tau-t)} \cdot \operatorname{erfc}(u) \times \right. \\ \left. \times \exp(u^2) \right] \times \left[ \operatorname{erf} \left[ \frac{y+h}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau-t)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{y-h}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau-t)}} \right] \right], \quad (2)$$

где  $u = \frac{x}{\sqrt{4 \cdot \alpha \cdot (\tau-t)}} + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau-t)}$ ; а – коэффициент температуропроводности,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала заготовки,  $\frac{\text{Дж}}{\text{мм} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$ ;  $q$  – плотность теплового потока,  $\frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с}}$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$ ;  $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$ .

Решение (2) достаточно просто трансформируется под условия прерывистого шлифования. Прерывистое шлифование – это несколько циклов нагрева-охлаждения продолжительностью  $t_c$ , имеющих место за время прохождения точки поверхности детали через дугу контакта  $L$ , которая рассчитывается по известной формуле:

$$L = \sqrt{2 \cdot R_g \cdot l}, \quad (3)$$

где  $R_g = \frac{R}{1 + \frac{R}{r}}$  – эквивалентный радиус круга;

$R$  – радиус круга;  $r$  – радиус заготовки;  $l$  – глубина шлифования.

Время  $t_n$  прохождения точки поверхности заготовки пути равному  $L$  находим делением  $L$  на  $V_d$ .

$$t_n = \frac{L}{V_\delta}, \quad (4)$$

где  $V_\delta$  – окружная скорость вращения заготовки.

Время цикла  $t_c$  нагрева-охлаждения заготовки

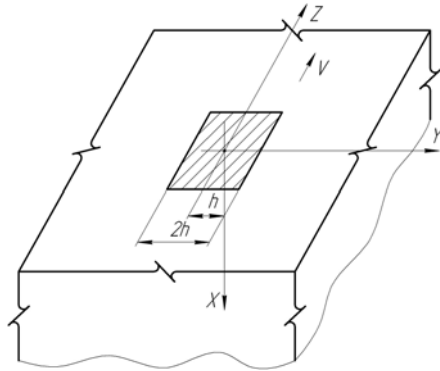
$$t_c = \frac{\delta + \delta_1}{V_k}, \quad (5)$$

где  $\delta, \delta_1$  – величины дуги выступа и впадины соответственно круга по наружной его окружности;  $V_k$  – окружная скорость круга.

циклов  
охлаждения

$$n = \frac{t_n}{t_c}.$$

Количество  
нагрева-



(6)

Рис. 1 – Развертка цилиндрической поверхности заготовки с источником тепла

Время контакта  $t_k$ , т.е. резания выступом круга

$$t_k = \frac{\delta}{V_k}, \quad (7)$$

Полная картина нагрева и охлаждения поверхности заготовки представляет собой последовательное суммирование температурных полей от каждого цикла. При этом пределы интегрирования по времени  $t$  должны программироваться так, чтобы источник тепла действовал только во время контакта круга с заготовкой и прекращал свое действие при отсутствии его до следующего контакта. Аналогичным образом должен программироваться коэффициент теплоотдачи. Во время контакта круга с заготовкой он равняется  $\alpha_1$ , а в отсутствие контакта –  $\alpha$ .

При записи уравнения (2) с вышеизложенным принимаем координату  $y=0$  и, поэтому, последний сомножитель в квадратных скобках уравнения (2) заменяем выражением:

$$2 \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{h}{\sqrt{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}} \right).$$

Окончательно уравнение, описывающее температурное поле в заготовке при прерывистом шлифовании приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} T(x, \tau) = & \frac{q \cdot \alpha}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{k=0}^n \int_{\substack{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k, 0, \text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \tau, t_c \cdot k + t_k)) \\ \text{if}(\tau \leq t_c \cdot k, 0, t_c \cdot k)}} \frac{2 \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{h}{\sqrt{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}} \right)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}} \times \\ & \times \exp \left( -\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot (\tau - t)} \right) \cdot \left[ 1 - \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha_1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot (\tau - t)} \times \right. \\ & \times \left[ 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} + \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha_1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau - t)} \right] \times \right. \\ & \left. \left. \times \exp \left[ \frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} + \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha_1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau - t)} \right]^2 \right] \right] dt, \quad (8) \end{aligned}$$

где  $k$  – номер цикла нагрева-охлаждения.

При вычислении  $T(x, \tau)$  желательно одновременно на графике  $T(x, \tau)$  показать кривую нагрева  $T_1(\tau)$  поверхности заготовки для  $x=0$ , получаемую при шлифовании сплошным кругом. В этом случае уравнение (8) преобразуется в:

$$\begin{aligned} T_1(\tau) = & \frac{q \cdot \alpha}{2 \cdot \lambda} \cdot \int_0^{\tau} \frac{2 \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{h}{\sqrt{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}} \right)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}} \cdot \left[ 1 - \frac{\alpha_1}{\lambda} \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot (\tau - t)} \times \right. \\ & \times \left[ 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{\alpha_1}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau - t)} \right] \cdot \exp \left[ \frac{\alpha_1}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau - t)} \right]^2 \right] dt \quad . \quad (9) \end{aligned}$$

Пример расчета по (8) и (9) для  $x=0$  и  $x=0,05$  мм с исходными данными приведен на распечатке (рис. 2).

На графиках видны три линии: верхняя – шлифование сплошным кругом  $Tl(\tau_j)$ , средняя – прерывистое шлифование при  $x=0$ , нижний график – температура при прерывистом шлифовании на глубине  $x=0,05$  мм. Из этих графиков очевидно преимущество прерывистого шлифования над сплошным и оно тем больше, чем больше циклов нагрева-охлаждения произойдет за время  $t_n$  – время перемещения точки поверхности заготовки на длину дуги контакта. Так, за два цикла нагрева-охлаждения максимальная температура при прерывистом шлифовании меньше в сравнении со сплошным примерно на 20%, а после 3<sup>х</sup> циклов – на 30%.

Для оценки возможности более значительного снижения температуры шлифуемой поверхности за счет интенсификации охлаждения поверхности заготовки в фазы отсутствия контакта с кругом выполнен расчет температур для исходных данных, приведенных на рисунке 3, где  $\alpha = 0,0018 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$ ,

и  $\alpha = 0,045 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$ , которые соответствуют охлаждению сухим воздухом и напорной струей жидкости на водной основе [6].

Из рисунка 3 видно, что на третьем цикле нагрева максимальная температура на 105 °С ниже при охлаждении напорной струей жидкости в сравнении с охлаждением воздухом, а на втором цикле – на 50 °С. Таким образом, максимальная интенсификация охлаждения поверхности заготовки вне зоны контакта позволяет уменьшить максимальную температуру на втором цикле менее чем на 10% от максимальной при охлаждении воздухом, и на 13% на третьем цикле нагрева-охлаждения.

Длина дуги режущей части абразивного сегмента:  $\delta_0 = 2,5$

Значение, равное половине высоты шлифовального круга:  $h_1 = 30$

Скорость вращения шлифовального круга:  $v_k = 50000$

Коэффициент теплопроводности материала заготовки:  $\lambda = 0,023$

Глубина измерения температуры слоя:  $x = 0$   $n = 3$

$N_{\text{цикл}} = 2,6 \cdot 10^3$   $\Delta\tau = 0,000001$   $j = 0..N$   $\tau_j := 0 + \Delta\tau \cdot j$

Длина дуги между сегментами:  $\delta_1 = 2,5$

Коэффициенты теплоотдачи:  $\alpha = 0,0018$   $\alpha_1 = 0$

Коэффициент температуропроводности:  $a = 3$

Плотность теплового потока:  $q = 209,3$

$t_c := \frac{\delta + \delta_1}{v_k} = 1 \times 10^{-3}$   $t_k := \frac{\delta}{v_k} = 5 \times 10^{-4}$

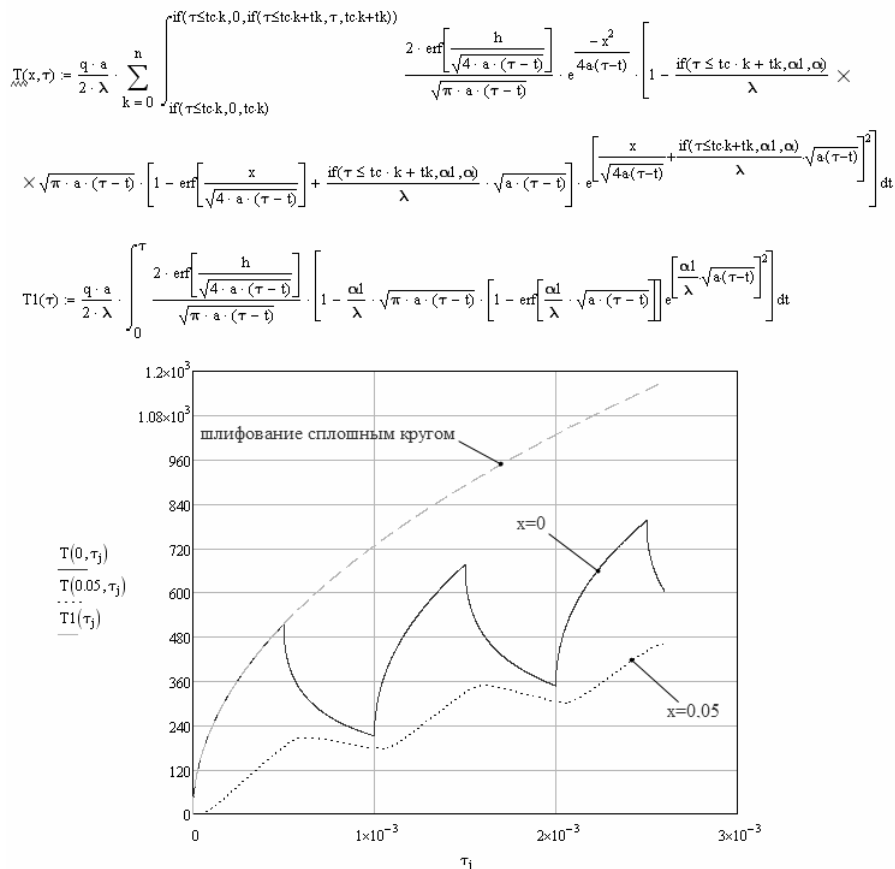


Рис. 2 – Сравнение температуры нагрева поверхности при шлифовании сплошным кругом с температурой, измеренной на различных глубинах  $x$  от поверхности заготовки, при шлифовании прерывистым кругом

Проанализируем возможности снижения нагрева интенсификацией охлаждающего действия СОЖ, поступающей в зону контакта. Для этого сравниваем расчеты  $T(x, \tau)$  для  $\alpha = 0,045 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$  при различных значениях коэффициента теплоотдачи в зоне контакта  $\alpha_1$ . На рисунке 4 приведены кривые нагрева-охлаждения при  $\alpha_1 = 0 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$  и

$\alpha_1 = 0,045 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$  при прочих равных условиях. Из этих графиков

видно, что интенсивное охлаждение поверхности заготовки в фазу контакта круга с заготовкой позволяет уменьшить максимальную температуру поверхности заготовки на третьем цикле нагрева-охлаждения приблизительно  $50^\circ\text{C}$ , а на втором – на  $20^\circ\text{C}$ .

Таким образом, обеспечив интенсивное охлаждение шлифуемой поверхности при прерывистом шлифовании в фазу контакта круга с заготовкой и вне его, можно снизить максимальную температуру за счет охлаждения после трех циклов нагрева-охлаждения приблизительно на 20%, а после двух циклов – на 10%.

Внимание, которое уделено в вышеприведенных сравнениях числу циклов нагрева-охлаждения, объясняется тем, что при круглом наружном шлифовании длина дуги контакта  $L$  значительно меньше ее значения в сравнении с плоским шлифованием, и скорости вращения заготовки при круглом шлифовании обычно значительно больше скорости подачи при плоском. Поэтому обеспечить большое значение циклов нагрева-охлаждения трудно, тем более, если учитывать конструктивные особенности сборного шлифовального круга с сегментами, что ограничивает желательное уменьшение длин дуг окружностей круга на выступах и впадинах. Следовательно, если ориентироваться на возможность обеспечения не более двух циклов нагрева-охлаждения, то эффект от интенсификации охлаждающего действия СОЖ невелик (не более 10%).

Однако если обратиться к [8], то видно, что интенсификация подачи СОЖ в зону контакта круга с заготовкой обеспечивает значительное снижение нагрева заготовки не за счет охлаждающего действия СОЖ, а за счет сложного суммарного физико-химического воздействия на поверхность заготовки, что приводит к снижению силы резания примерно на 20%, а значит и к снижению плотности теплового потока.

Длина дуги режущей части абразивного сегмента:  $\delta_0 = 23$

Длина дуги между сегментами:  $\delta_1 = 23$

Значение, равное половине высоты шлифовального круга:  $h = 30$

Коэффициенты теплоотдачи:  $\alpha = 0.0018$   $\alpha_1 = 0$

Скорость вращения шлифовального круга:  $v_k = 50000$

Коэффициент температуропроводности:  $a = 3$

Коэффициент теплопроводности материала заготовки:  $\lambda = 0.023$

Плотность теплового потока:  $q = 209.3$

Глубина измерения температуры слоя:  $x = 0$   $n = 3$

$t_c := \frac{\delta + \delta_1}{v_k} = 1 \times 10^{-3}$   $t_k := \frac{\delta}{v_k} = 5 \times 10^{-4}$

$N_x := 2.6 \cdot 10^3$   $\Delta\tau := 0.000001$   $j = 0..N$   $\tau_j := 0 + \Delta\tau \cdot j$



$$T(x, \tau) := \frac{q \cdot a}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{k=0}^n \int_{\text{if}(\tau \leq t_c k, 0, \text{if}(\tau \leq t_c k + t_k, \tau, t_c k + t_k))} \frac{2 \cdot \text{erf}\left[\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}\right]}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)}} \cdot e^{\frac{-x^2}{4a(\tau-t)}} \cdot \left[ 1 - \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha 1, \alpha)}{\lambda} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)} \cdot \left[ 1 - \text{erf}\left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}\right] + \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha 1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)} \right] \cdot e^{\left[\frac{x}{\sqrt{4a(\tau-t)}} + \frac{\text{if}(\tau \leq t_c k + t_k, \alpha 1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)}\right]^2} \right] dt \\ T1(\tau) := \frac{q \cdot a}{2 \cdot \lambda} \cdot \int_0^\tau \frac{2 \cdot \text{erf}\left[\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}\right]}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)}} \cdot \left[ 1 - \frac{\alpha 1}{\lambda} \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)} \cdot \left[ 1 - \text{erf}\left[\frac{\alpha 1}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)}\right] \right] \cdot e^{\left[\frac{\alpha 1}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)}\right]^2} \right] dt \\ \alpha_{\text{нов}} = 0.045 \\ T2(x, \tau) := \frac{q \cdot a}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{k=0}^n \int_{\text{if}(\tau \leq t_c k, 0, t_c k)} \frac{2 \cdot \text{erf}\left[\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}\right]}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)}} \cdot e^{\frac{-x^2}{4a(\tau-t)}} \cdot \left[ 1 - \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha 1, \alpha)}{\lambda} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)} \cdot \left[ 1 - \text{erf}\left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}\right] + \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha 1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)} \right] \cdot e^{\left[\frac{x}{\sqrt{4a(\tau-t)}} + \frac{\text{if}(\tau \leq t_c k + t_k, \alpha 1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)}\right]^2} \right] dt$$

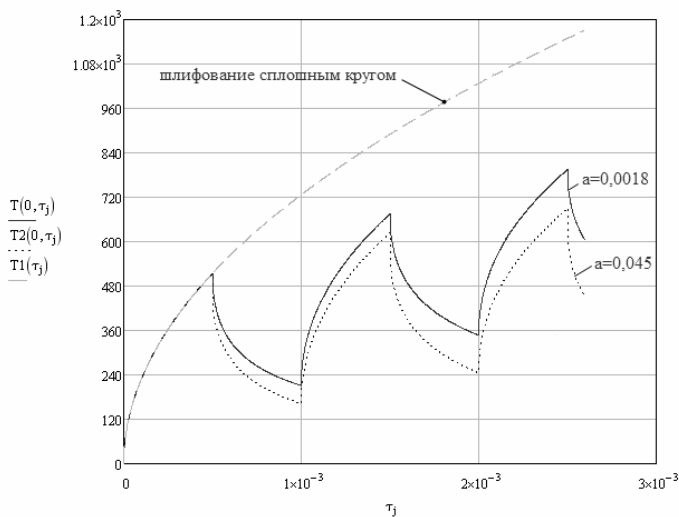


Рис. 3 – Сравнение температуры нагрева поверхности заготовки ( $x=0$ ) при различных значениях коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  вне зоны контакта круга с заготовкой

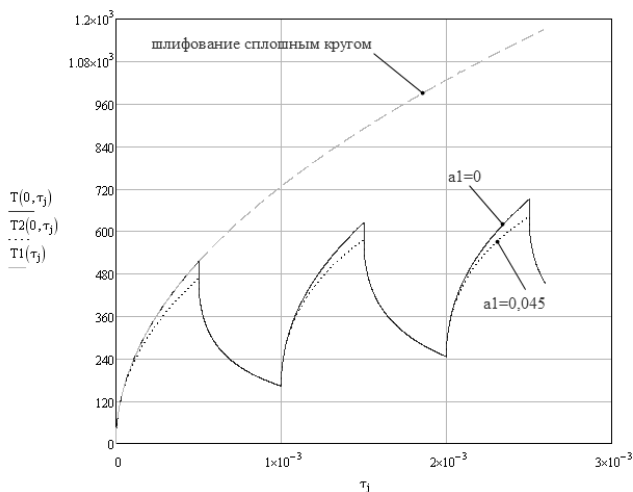


Рис. 4 – Сравнение температуры нагрева поверхности заготовки ( $x=0$ ) при различных значениях коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$  в зоне резания

## Выводы

1. Разработанная модель позволяет выполнить расчет температурного поля поверхности заготовки, обрабатываемой шлифованием, прерывистым кругом при быстродвижущемся источнике тепла с возможностью варьирования коэффициентами теплоотдачи в зоне контакта и вне его.

2. Охлаждающее действие СОЖ позволяет незначительно (примерно до 10%) уменьшить максимальную температуру при прерывистом круглом наружном шлифовании.

3. Интенсифицируя подачу СОЖ в зону контакта и вне ее при прерывистом шлифовании через круг или корпус сборного круга, можно прогнозировать возможность уменьшения максимальной температуры шлифуемой поверхности как за счет охлаждающего действия СОЖ, так и за счет ее комплексного физико-химического воздействия.

**Список литературы:** 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с. 2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с. 3. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. – Киев; Одесса: Вища шк., 1986. – 174 с. 4. Ефимов В.В. Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании. – Саратов: СГУ, 1985. – 140 с. 5. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Математическое моделирование температурного поля в шлифуемой заготовке периферией круга // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – № 2 (8). – 2004. – С. 52-63. 6. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с. 7. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 144 с. 8. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Влияние давления подачи СОЖ на нагрев заготовки при врезном шлифовании // Вісник національного технічного університету «ХПІ» – Х.: НТУ «ХПІ». – 2005. – С. 210-214.

Поступила в редакцию 23.09.2010